

## بررسی اثر تغییر غلظت مس و کارسرد بر ریزساختار و رفتار پیرسازی آلیاژهای برپایه آلومینیوم

شهاب خامنه اصل\*، مهدی ابراهیمی

دانشگاه تبریز، آزمایشگاه مواد نو، تبریز، ایران.

یادداشت پژوهشی

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۰۹/۱۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۰۴/۲۴

**چکیده** آلیاژهای Al-Cu به علت نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خستگی نسبی خوب، کاربردهای بسیار گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. در این تحقیق، نمونه‌هایی با غلظت‌های متفاوت مس که بر روی آنها به ترتیب عملیات محلول سازی، کارسرد و سپس پیرسازی در مدت زمان‌های مختلف انجام شده مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از آزمون سختی سنجی ویکرز و میکروسکوپ الکترونی عبوری انجام شد. نتایج حاصله ارتباط معناداری بین عملیات حرارتی اعمال شده، ریزساختار و خواص مکانیکی نشان می‌دهد به طوری که در نمونه‌هایی با درصد‌های وزنی مس بیشتر از ۱/۲، رسوب‌های  $\theta'$  تشکیل شده در اثر پیرسازی مشهود می‌باشد. نتایج میکروسکوپی الکترونی عبوری نشان می‌دهد که رسوب‌گذاری در نمونه‌های ۸۰ درصد کارسرد شده به طور کامل متفاوت با نمونه‌های دیگر بوده و در اثر پیرسازی جوانه‌زنی فاز پایدار  $\theta$  قبل از رسوب‌گذاری فاز شبه پایدار  $\theta'$  اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده گردید که رسوب‌های  $\theta'$  تشکیل شده در این نمونه در مقایسه با نمونه کارسرد نشده دارای ضخامت بیشتری می‌باشند. بدین ترتیب امکان انتخاب عمیات حرارتی مناسب برای رسیدن به بهینه خواص میسر شد.

**کلمات کلیدی:** آلیاژ Al-Cu، کارسرد، پیرسازی، رسوب، ریزساختار، میکروسکوپی الکترونی عبوری.

## Study of Effects of Copper Content and Cold Work on Microstructure and Aging Behavior of Al based

Shahab Khameneh Asl\*, Mehdi Ebrahimi

University of Tabriz, New materials Laboratory, Tabriz, Iran.

**Abstract** Al-Cu alloys have extensive applications in the production of many industries. In this paper, the effects of both copper content and cold work amount on the microstructure and aging behavior of the alloys studied. The mechanical and microstructural parameters determined by using Vickers hardness and transmission electron microscopy, the present study is dealing with the variation of hardness and microstructure as a result of different copper contents and cold work amounts performed on Al-Cu alloys samples which has done solution heat treatment, cold worked and aged in different time intervals. The results indicate that for based samples, density and thickness of  $\theta'$  precipitates increased by increasing copper concentration. Precipitation behavior of the 80% cold rolled samples was completely different from that of other samples and the nucleation of the equilibrium  $\theta$  phase commenced prior to the precipitation of the metastable  $\theta'$  phase. Moreover the thickness of precipitates was observed to be more than that for samples which were not cold worked. As a result, regarding the various microstructures produced by aging processes, one may choose an appropriate combination of copper content and cold work amount according to the desired application.

**Keywords:** Al-Cu Alloys, Cold work, Precipitation, Microstructure, TEM, Aging.

## ۱- مقدمه

آلیاژهای پایه آلومینیوم به علت نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی بالا و مقاومت به خستگی نسبی خوب کاربردهای بسیار گسترده‌ای در ساخت قطعات هواپیما، صنایع هوافضا و خودروسازی داشته و مطالعه بر روی این آلیاژها از اهمیت صنعتی بالایی برخوردار می‌باشد. اکثر آلیاژهای پایه آلومینیوم کار شده، بیشتر سختی خود را از طریق رسوب سختی به دست می‌آورند [۱].

برای اولین بار فرآیند رسوب سختی در سال ۱۹۰۶ میلادی توسط دکتر ویلم آلمانی کشف گردید. از زمان ویلم تاکنون دانشمندان و مهندسان متعددی فرآیند سختی را مطالعه و مطالب مختلف و متعددی در مورد آن یافته‌اند ولی هنوز هم سازوکار دقیق آن مورد مطالعه می‌باشد [۲ و ۳]. عمده تحقیقات نشان می‌دهد که دو روش عمده برای افزایش استحکام آلیاژهای آلومینیوم عبارتند از:

\* پخش فاز دوم به صورت محلول جامد و کارسرد آلیاژ

(در آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی)

\*\* حل کردن عناصر آلیاژساز به صورت محلول جامد

و رسوب دادن آنها به صورت ذرات با پخش یکنواخت میکروسکوپی (در مورد آلیاژهای قابل عملیات حرارتی و رسوب سختی) [۴].

در بررسی های ریزساختاری آلیاژهای آلومینیوم - مس

طی فرآیند رسوب سختی پنج فاز، محلول جامد فوق اشباع مناطق GP (1GP)  $\theta''$  (یا مناطق GP۲) فاز  $\theta'$  و فاز  $\theta$  قابل مشاهده است [۴] که هر یک از این فازها سازوکار تشکیل و افزایش استحکام متفاوتی دارند.

بررسی مورفولوژی و چیدمان فازهای تشکیل دهنده آلیاژ

در تحلیل رفتار مکانیکی و سختی لازم می‌باشد. این مهم با توسعه فناوری میکروسکوپی الکترونی ابعاد تازه‌ای به خود گرفته، به طوری که می‌توان سازوکار حرکت نابجایی‌ها و قفل شدن آنها را تحلیل کرد. در مدل گرولد، GP به صورت یک تک‌لایه‌ای مس روی صفحه (۱۰۰) می‌باشد و GP۲ یا  $\theta''$  شامل دو لایه اتم مس که توسط سه لایه از اتم آلومینیوم از هم جدا شده است [۵].  $\theta''$  به صورت رسوب‌های به طور کامل همدوس با رابطه خاص با زمینه تشکیل می‌شود. در مدت

زمان‌های طولانی پیرسازی در اثر به هم پیوستن رسوب‌های  $\theta'$  و درشت شدن آنها ممکن است صفحات پهن بشقاب‌های  $\theta'$ ، همدوسی خود را از دست دهند و فصل مشترک نیمه‌همدوس با زمینه ایجاد کنند. در اینجا رسوب‌های همدوس  $\theta'$ ، نسبت قطر به ضخامت بیشتری نسبت به رسوب‌های نیمه‌همدوس دارند [۶]. ترکیب شیمیایی آلیاژ Al-Cu یک عامل مهم دیگر در کنترل نسبت قطر به ضخامت بشقاب‌های  $\theta'$ ، می‌باشد که با افزایش غلظت مس این مقدار کاهش می‌یابد. وقتی غلظت مس در آلیاژ Al-Cu کاهش می‌یابد، نیروی محرکه برای جوانه زنی رسوب کمتر شده بنابراین، تراکم بشقاب‌های، به وجود آمده کمتر می‌شود و احتمال به هم پیوستن بشقاب‌ها کاهش یافته و در نتیجه، نسبت قطر به ضخامت رسوب‌ها افزایش می‌یابد [۷]. هرچند که در طی سالها، آلیاژ Al-Cu به عنوان یکی از آلیاژهای مهم صنعتی به کار گرفته شده است، اما تحقیقات منسجمی در زمینه تأثیر هم‌زمان تغییر غلظت مس و کارسرد بر ریزساختار و رفتار رسوب سختی این آلیاژ انجام نشده است. در این تحقیق، با استفاده از نمونه‌هایی با غلظت‌های متفاوت مس که بر روی آنها به ترتیب عملیات محلول‌سازی، کارسرد و سپس، پیرسازی در دماها و مدت زمان‌های مختلف انجام شده و در نهایت، با استفاده از آزمون سختی‌سنجی و نیز مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری، به تغییرات حاصل در سختی و ریزساختار این آلیاژ پرداخته شده است.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق، آلیاژهای آلومینیوم - مس با درصد‌های ۱/۰، ۲/۴۸، ۱/۹۷ و ۲/۹۶ وزنی از مس، از شرکت ALCOA استفاده شده است. عملیات محلول‌سازی و نورد سرد نمونه‌ها در درجه حرارت  $550^{\circ}C$  به مدت یک ساعت در کوره انجام شده و بلافاصله در آب سریع آب‌دهی شده‌اند. نمونه‌ها تحت نورد سرد با درصد‌های مختلف صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد قرار گرفتند. عملیات پیرسازی نمونه‌ها در درجه حرارت  $180^{\circ}C$  به مدت زمان یک تا ۱۰ روز بر روی نمونه‌ها اعمال گردید. در خلال عملیات حرارتی در بازه زمانی یک، سه، هفت و ده روز، نمونه‌ها در آب آب‌دهی شده و سختی آنها اندازه‌گیری شد. سختی نمونه‌ها با استفاده از روش ویکرز با نیروی سه کیلوگرم

و رسوب و  $\Delta X$  مقدار فوق‌اشباع ایجاد شده پیش از رسوب‌گذاری می‌باشد. از طرفی مهمترین عامل اصلی که  $\Delta G^*$  را کنترل می‌کند نیروی رانش برای رسوب‌گذاری، یعنی  $Gv\Delta$  می‌باشد. در محلول‌های رقیق  $\Delta G_v \propto \Delta X$  است. پس می‌توان نتیجه گرفت هرچه قدر غلظت اتم‌های حل‌شونده در آلیاژ کمتر باشد، به‌طور مثال، نمونه Al-0.48wt%Cu، طبق رابطه ۲، نیروی رانش برای رسوب‌گذاری کمتر می‌شود و با کاهش آن طبق رابطه ۱،  $\Delta G^*$  افزایش می‌یابد و جوانه‌زنی رسوب را مشکل می‌سازد.

در این آلیاژ، برای نمونه‌های ۲۰ و ۴۰ درصد کارسرد شده نیز مثل نمونه بدون کارسرد قضیه رسوب‌سختی منتفی می‌باشد به‌علت پایین بودن غلظت مس و بالا بودن  $\Delta G^*$ ، چگالی رسوب تشکیل‌شده آن بسیار کم می‌باشد که تأثیر ناچیزی روی افزایش سختی می‌گذارد. از طرفی کاهش سختی ناشی از بازیابی و تبلور مجدد انتظار می‌رود. در اینجا نیز به علت پایین بودن درصد کارسرد نیروی محرکه تبلور مجدد کم بوده و زمان طولانی لازم است تا این عملیات در این دما بر روی نمونه‌ها انجام گیرد و به دلیل آن نمودار، به‌طور تقریبی به‌صورت خط راست می‌باشد. در نمونه های ۶۰ و ۸۰ درصد کارسرد پدیده کاهش سختی بر افزایش سختی غلبه می‌کند. بدیهی است که چگالی رسوب تشکیل‌شده و افزایش سختی ناشی از این پدیده کم می‌باشد. در عوض این نمونه‌ها درصد بالایی از تغییر شکل پلاستیک بر روی آنها انجام شده که باعث افزایش چگالی نابجایی‌ها و نیروی محرکه برای عملیات بازیابی و تبلور مجدد گردیده است. افزایش نیروی محرکه، باعث کاهش زمان عملیات تبلور مجدد می‌گردد. در نتیجه، در طی مدت زمان یک روز، این کاهش در نمودار دیده می‌شود.

برای نمونه‌های با درصد مس بالا نیز همان شرایط حکم‌فرما است. با این تفاوت که در نمونه بدون کارسرد و ۲۰ درصد کارسرد شده، افزایش سختی ملاحظه می‌شود. این افزایش ناشی از به‌وجود آمدن رسوب‌های شبه‌پایدار  $\theta'$  می‌باشد. در نمونه B به علت بالا بودن غلظت مس نسبت به نمونه A، چگالی رسوب‌های شبه‌پایدار به‌وجود آمده بیشتر است و افزایش سختی ناشی از آن نسبت به نمونه A قابل انتظار است.

یکی از جالب‌ترین نتایج سختی به‌دست آمده مربوط به

توسط دستگاه InstronWolpert انجام گردید. مطالعات ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی/ عبوری (STEM) مدل Philips CM200 در ولتاژ شتاب‌دهی 200kV، با نمونه‌گیر تک‌محوری و توسط تفنگ الکترونی LaB<sub>6</sub> انجام گرفت. ریزساختارها در حالت زمینه روشن، زمینه تاریک و طرح پراش بررسی گردید. آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه الکتروپولیش مدل Tenupol-5 انجام شد.

با توجه به اینکه چهار آلیاژ مورد بررسی در سه دمای مختلف پیرشده، در کل ۱۲ نمودار سختی برحسب زمان کشیده شده است. از علامت‌های اختصاری مطابق جدول ۱ برای نام‌گذاری آنها استفاده شده است.

جدول ۱. علامت‌های اختصاری به کار برده شده برای آلیاژها و دماهای

مختلف پیرسازی

علامت اختصاری	00	20	40	60	80
درصد کارسرد	0%	20%	40%	60%	80%
علامت اختصاری		A	B	C	D
آلیاژ	Al-0.48wt%Cu	Al-1.2wt%Cu	Al-1.97wt%Cu	Al-2.96wt%Cu	

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱ نتایج سختی‌سنجی

جدول ۲ نتایج سختی‌سنجی نمونه‌های مختلف مورد عملیات قرار گرفته را خلاصه کرده است. نتایج نشان می‌دهد که در مورد آلیاژهای Al-0.48wt%Cu می‌باشد. در نمونه بدون کارسرد انتظار بر این است که با گذشت زمان، سختی افزایش می‌یابد ولی چنین اتفاقی نمی‌افتد. به علت پایین بودن مقدار مس در این آلیاژ، نیروی محرکه برای جوانه‌زنی رسوب کم می‌باشد و علت کاهش سختی با زمان را می‌توان به پدیده درشت شدن دانه‌ها نسبت داد.

در جوانه‌زنی همگن، سد انرژی فعال‌سازی برابر است با

[۸]:

$$\Delta G^* = \frac{16}{3} \pi \frac{\gamma^3}{(\Delta G_v - \Delta G_s)^2} \quad (1) \text{ معادله}$$

$$\Delta G_v \propto \Delta X \quad (2) \text{ معادله}$$

در این روابط،  $Gv\Delta$  انرژی آزاد حجمی ناشی از انجام استحاله،  $G_s\Delta$  انرژی کرنش ناشی از ناهم‌خوانی دو شبکه زمینه

قفل کردن نابجایی‌ها مانع تحرک نابجایی‌ها شده و وقوع تبلور مجدد را به تعویق می‌اندازد [۱۳]. ثابت شدن نمودار سختی بعد از گذشت یک روز صحت مطالب فوق را نشان می‌دهد.

در نمونه ۴۰ درصد کارسرد شده، سختی حاصل بعد از عملیات محلول‌سازی به‌طور تقریبی ثابت بوده و با گذشت زمان تغییر نمی‌کند. بیشینه سختی حاصل برای یک آلیاژ در دمای مشخص پیرسازی، مقدار معینی می‌باشد که در نمونه بدون کارسرد، بعد از گذشت چهار روز و در نمونه ۲۰ درصد کارسرد شده، بعد از یک روز به این مقدار می‌رسد اما در نمونه ۴۰ درصد کارسرد شده این سختی در اثر نورد حاصل می‌گردد. پس کارسرد انجام شده بر روی بیشینه سختی تأثیر ندارد بلکه مدت زمان رسیدن به آن را در پیرسازی مصنوعی کاهش می‌دهد [۱۲].

در این نمونه، پدیده رسوب‌گذاری و تبلور مجدد با هم رقابت می‌کنند. در اینجا هم رسوب‌گذاری و هم تبلور مجدد مشاهده می‌شود که یکی باعث افزایش سختی و دیگری باعث کاهش سختی می‌گردد و این دو در حال تعادل با یکدیگر هستند و همین مانع افت سختی می‌شود.

روند تغییرات سختی برای نمونه‌های ۶۰ و ۸۰ درصد کارسرد شده شبیه هم می‌باشد. کارسرد با درصد کاهش سطح مقطع بالا سبب می‌شود که محلول جامد دچار پیچیدگی شود که حتی فاز نیمه‌همدوس  $\theta'$  نتواند جوانه بزند. از طرف دیگر جوانه‌زنی فاز  $\theta$  در مناطقی که به‌طور گسترده دچار پیچیدگی شده است تسهیل می‌گردد. با پیشرفت پیرسازی و به‌وجود آمدن رسوب‌های ناهمدوس  $\theta$  و رخ دادن بازیابی و چندوجهی‌شدن سختی افت می‌کند و شبکه بلوری تا حدودی به سمت کاهش نقایص پیش می‌رود. بنابراین، امکان جوانه‌زنی برای فاز نیمه‌همدوس  $\theta'$  فراهم می‌گردد.

در این نمونه‌ها تشکیل رسوب ناهمدوس پایدار به جای رسوب نیمه‌همدوس شبه‌پایدار، از یک آلیاژ با درصد کارسرد بالا اثر پیرسازی بر افزایش سختی را کاهش می‌دهد [۱۳] و بعد از گذشت زمان یک روز افت شدید در سختی مشاهده می‌شود.

بعد از گذشت مدت زمان یک روز و کاهش سختی ناشی از تشکیل رسوب‌های ناهمدوس، با به‌وجود آمدن رسوب‌های نیمه‌همدوس  $\theta'$ ، منحنی سختی به جای کاهش

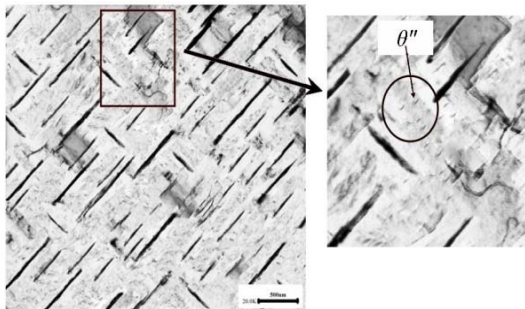
آلیاژ Al-1.97wt%Cu می‌باشد. نمونه بدون کارسرد شده، یک رفتار کلاسیک و قابل انتظار از آلیاژ Al-Cu را به نمایش می‌گذارد به طوری که با گذشت زمان، سختی افزایش یافته و بعد از رسیدن به بیشینه، سختی شروع به کاهش می‌کند. افزایش سختی ناشی از پیرشدن در دمای  $180^\circ\text{C}$  را می‌توان به تشکیل رسوبات شبه‌پایدار  $\theta'$  نسبت داد [۹]. با توجه به نتایج ریزساختارشناسی که در ادامه نشان داده می‌شود، می‌توان چنین برداشت داشت که رسوب‌های  $\theta'$  دارای مورفولوژی بشقاب مانند می‌باشد که فصل مشترک همدوس در طول بزرگترین وجه بشقاب و فصل مشترک نیمه‌همدوس در لبه بشقاب دارند [۱۰]. نسبت طول به عرض در بشقاب‌های  $\theta'$  اغلب ۴۰ و یا بیشتر می‌باشد که بستگی به شرایط پیرسازی و تاریخچه فرآیند نمونه دارد [۱۰].

فاز شبه‌پایدار  $\theta'$  ساختار تتراگونال دارد. ترکیب شیمیایی تقریبی آن  $\text{CuAl}_2$  می‌باشد. صفحه‌های  $\theta'$  (۰۰۱) با  $\text{Al}$  {۰۰۱} یکسان است که فصل مشترک همدوس ایجاد می‌کنند اما ساختار بلوری صفحه‌های (۱۰۰) و (۰۱۰)  $\theta'$  با ساختار بلوری زمینه متفاوت می‌باشد و در امتداد [۱۰۰] عدم انطباق شدید دیده می‌شود که باعث به‌وجود آمدن فصل مشترک های ناهمدوس یا نیمه‌همدوس پیچیده با زمینه می‌شوند [۱۱].

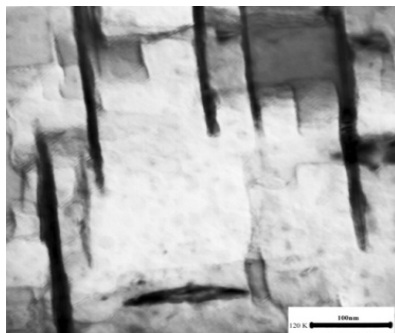
علت تشکیل رسوب  $\theta'$  موازی با صفحه {۱۰۰} زمینه را می‌توان بدین صورت توجیه کرد که اغلب فلزات از لحاظ کششانی ناهمسانگرد هستند و در امتدادهای  $\langle 100 \rangle$  نرم و در امتدادهای  $\langle 111 \rangle$  سخت هستند. در این وضعیت شکلی که کمینه انرژی کرنش را دارد دیسکی موازی با صفحه {۱۰۰} زمینه است زیرا بخش عمده عدم انطباق در امتدادهای نرم عمود بر دیسک جای می‌گیرد [۱۱].

در نمونه ۲۰ درصد کارسرد شده، بیشینه سختی بعد از یک روز حاصل می‌شود که در مقایسه با نمونه کارسرد نشده، مدت زمان رسیدن به بیشینه سختی از چهار روز به یک روز کاهش یافته است [۱۲]. در اینجا کارسرد انجام شده باعث تسریع در امر رسوب‌گذاری شده است چون در طی این فرآیند چگالی عیوب و یا به عبارتی بهتر، محل‌های مساعد جوانه‌زنی افزایش می‌یابد و در نهایت، تشکیل رسوب  $\theta'$  تسریع می‌گردد. بعد از رسیدن به بیشینه سختی، افت سختی نداریم و سختی تا ۱۰ روز ثابت می‌ماند. رسوب‌های به‌وجود آمده با

که با توجه به تصویر زمینه روشن، بدون شک مربوط به رسوب‌هایی شبه‌پایدار  $\theta''$  و  $\theta'$  می‌باشد.

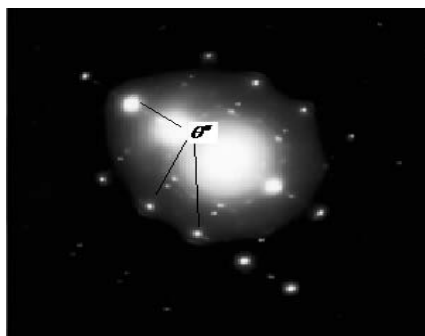


(الف)

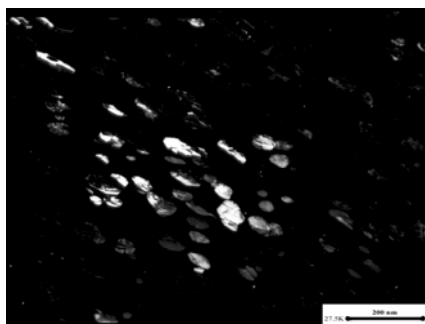


(ب)

شکل ۱. تصویر زمینه روشن نمونه (۱) Al-2.96wt%Cu بدون کارسرد و پیرسازی شده در دمای  $180^\circ\text{C}$  به مدت یک روز (الف) با بزرگنمایی  $20000\times$  (ب) با بزرگنمایی  $120000\times$ .



شکل ۲. طرح پراش تک محوره نمونه (۱) Al-2.96wt%Cu بدون کارسرد و پیرسازی شده در دمای  $180^\circ\text{C}$  به مدت یک‌روز.



شکل ۳. تصویر زمینه تاریک پراش تک‌محوره نمونه (۲) Al-1.97wt%Cu بدون کارسرد و پیرسازی شده در دمای  $80^\circ\text{C}$  به مدت چهار

روز.

یک مقدار ثابتی را به خود می‌گیرد. در اینجا رسوب‌های  $\theta'$  به‌وجود آمده مانع از کاهش سختی در اثر فرآیند تبلور مجدد می‌گردند.

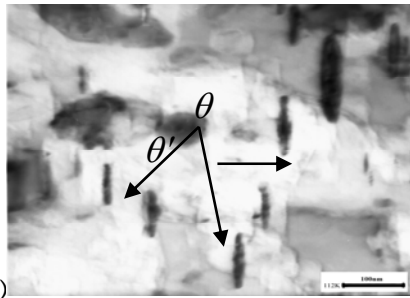
نتایج مربوط به آلیاژ Al-2.96wt%Cu می‌باشد همان شرایط نمونه با مقدار مس کمتر را دارد با این تفاوت در نمونه ۴۰ درصد کارسرد شده به‌جای ثابت ماندن سختی، افت سختی مشاهده می‌شود که ناشی از سختی زیاد حاصل این آلیاژ طی عملیات محلول‌سازی و نورد می‌باشد. به‌طور کلی با افزایش درصد مس حتی در حالت محلول جامد فوق‌اشباع سختی افزایش می‌یابد و پیک سختی و استحکام تسلیم در خلال پیرشدن افزایش می‌یابد [۹].

جدول ۲. مقدار سختی ویکرز نمونه‌ها با درصد مس و کار سرد و زمان پیرسازی متفاوت در دمای  $180^\circ\text{C}$ .

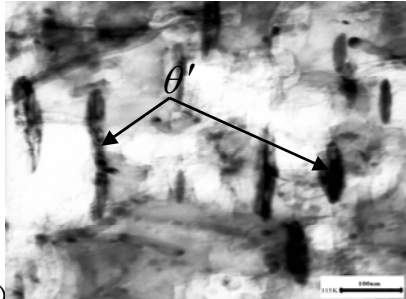
نمونه‌های پیرشده در دمای $180^\circ\text{C}$	مقدار کار سرد	سختی (HV)				
		محلول سازی شده	مدت زمان پیری			
			۱ روز	۴ روز	۷ روز	۱۰ روز
Al-0.48wt%Cu (A2)	0%CW	24	22/7	20/6	21/4	21/4
	20%CW	31/5	30/5	29/7	28/7	30
	40%CW	36/6	36	34/8	34/8	35
	60%CW	42/9	40	35/3	36	42/9
	80%CW	48/1	45/4	42/9	42/2	36/6
Al-1.2wt%Cu (B2)	0%CW	26/9	27/5	34/8	34/2	43/6
	20%CW	42	45/4	50/2	51/1	50/2
	40%CW	54/3	59	51/1	54/3	51/1
	60%CW	61/8	56/8	55	53/3	57/9
	80%CW	68/5	63/1	57/9	57/9	57/9
Al-1.97wt%Cu (C2)	0%CW	42/9	63	70/9	64/8	65
	20%CW	63/9	72/5	67/5	66/1	61/8
	40%CW	70/9	72/5	69/4	66/1	66/1
	60%CW	89	73/5	70/9	67/5	66/1
	80%CW	92/7	73/5	70/9	66/1	61/8
Al-2.96wt%Cu (D2)	0%CW	54/3	66/1	78	80	78
	20%CW	70	78	76/3	73/5	70/9
	40%CW	96/6	91/2	78	73/5	76/3
	60%CW	105	91/2	76/3	70/9	76/3
	80%CW	115	86/9	76/3	76/3	66/1

### ۲-۳ بررسی‌های ریزساختاری

تصاویر میکروسکوپی عبوری برخی از نمونه‌ها برای بررسی و مقایسه نتایج در اشکال ۱-۹ نشان داده شده است. در این اشکال (۱-۹) وجود رسوب‌های شبه‌پایدار  $\theta''$  و  $\theta'$  که دارای مورفولوژی بشقاب‌مانند می‌باشند و هر دو آنها در جهت خاص بلوری، در زمینه تشکیل شده‌اند. چگالی رسوب‌های تشکیل شده در زمینه زیاد می‌باشند، به‌طوری‌که اکثر نواحی زمینه را دربرگرفته‌اند. هم‌چنین در این شکل رسوب  $\theta$  پایدار دیده نمی‌شود. شکل ۲ نیز طرح پراش همین نمونه را نشان می‌دهد که علاوه بر نقاط واضح که مربوط به زمینه می‌باشد، تعداد نقاط اضافی در طرح پراش قابل رویت است

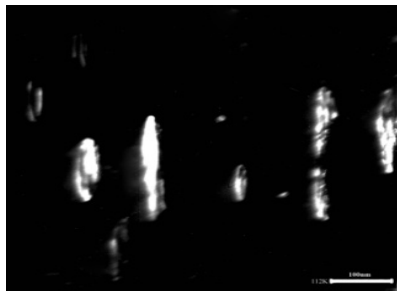


(الف)

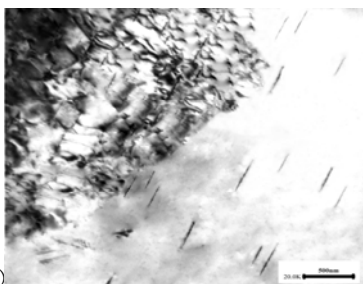


(ب)

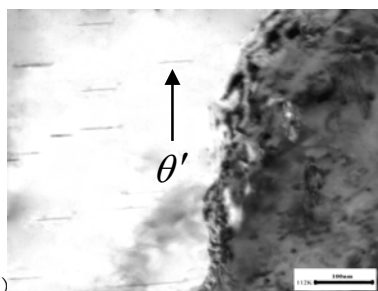
شکل ۷. تصویر زمینه روشن از نمونه (۴) Al-2.96wt%Cu ۸۰ درصد کارسرد و پیرسازی شده در دمای  $180^{\circ}C$  به مدت یک روز (الف) با بزرگنمایی  $112000\times$  (ب) با بزرگنمایی  $115000\times$ .



شکل ۸. تصویر زمینه تاریک از نمونه (۴) Al-2.96wt%Cu 80 درصد کارسرد و پیرسازی شده در دمای  $180^{\circ}C$  به مدت یک روز.

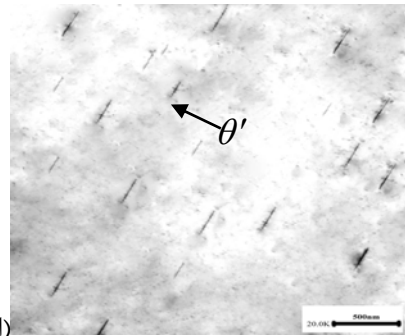


(الف)

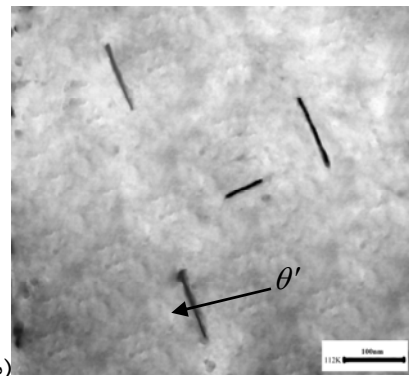


(ب)

شکل ۹. تصویر زمینه روشن از نمونه (۵) Al-1.97wt%Cu ۴۰ درصد کارسرد و پیرسازی شده در دمای  $180^{\circ}C$  به مدت یک روز (الف) با بزرگنمایی  $X$  و پیرسازی شده در دمای  $180^{\circ}C$  به مدت یک روز (ب) با بزرگنمایی  $112000\times$ .

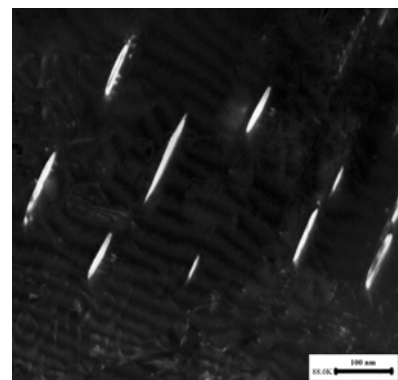


(الف)

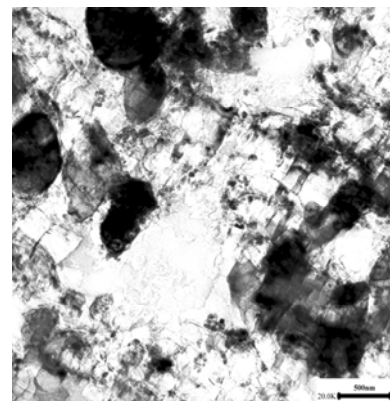


(ب)

شکل ۴. تصویر زمینه روشن از نمونه (۳) Al-1.2wt%Cu بدون کارسرد و پیرسازی شده در دمای  $180^{\circ}C$  به مدت یک روز (الف) با بزرگنمایی  $X$  و پیرسازی شده در دمای  $180^{\circ}C$  به مدت یک روز (ب) با بزرگنمایی  $112000\times$ .



شکل ۵. تصویر زمینه تاریک از نمونه (۳) Al-1.2wt%Cu بدون کارسرد و پیرسازی شده در دمای  $180^{\circ}C$  به مدت یک روز.



شکل ۶. تصویر زمینه روشن از نمونه (۴) Al-2.96wt%Cu 80 درصد کارسرد و پیرسازی شده در دمای  $180^{\circ}C$  به مدت یک روز.

ضخامت رسوب‌های  $\theta'$  تشکیل شده در اثر پیرسازی افزایش می‌یابد. انجام کارسرد با درصد پایین (۲۰٪) در نمونه‌های Al-Cu پیرشده در دمای  $180^\circ\text{C}$  باعث تسریع در امر رسوب‌گذاری و کاهش مدت زمان رسیدن به بیشینه سختی می‌شود. رسوب‌گذاری در نمونه‌های ۸۰ درصد کارسرد شده به‌طور کامل متفاوت با نمونه‌های دیگر می‌باشد و جوانه‌زنی فاز پایدار  $\theta$  قبل از رسوب‌گذاری فاز شبه‌پایدار  $\theta'$  اتفاق می‌افتد. ضخامت رسوب‌های  $\theta'$  تشکیل شده در نمونه ۸۰ درصد کارسرد شده در مقایسه با نمونه بدون کارسرد بیشتر می‌باشد. با توجه به ریزساختارهای مختلف به‌وجود آمده در حین فرآیند پیرسازی می‌توان برحسب کاربرد، آلیاژهای متفاوتی با درصدهای مختلف کارسرد استفاده نمود.

### مراجع

- Nie, J.F., Muddle, B.C., Microstructural design of high-strength aluminum alloys, *Journal of Phase Equilibria*, 19(6) (1998) 543-551
- Martin, J.W., *Precipitation Hardening*, First edition, Oxford, New York, Pergamon Press, (1968).
- Brooks, C.R., *Heat treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*, (1982).
- Davis, J.R., *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM Specialty Hand book, Ohio, USA, (1993).
- Sato, T., Takahashi, t., High resolution electron microscopy on the layered structures of GP zones in an Al-1.7at%Cu alloy, *Scripta Metallurgica*, 22(7) (1988) 941-946.
- Sankaran, R., Laird, C., On the Kinetics of growth of plate precipitates in Al-Ag, Al-Au and Al-Cu alloys, *Scripta Metallurgica*, 11(5) (1977) 383-386.
- Liu, G., Zhang, G.J., Ding, X.D., Sun, J., Chen, K.H., Modeling the strengthening response to aging process of heat-treatable aluminum alloys containing plate/disc- or rod/needle-shaped precipitates, *Materials Science and Engineering A*, 344(1-2) (2003) 113-124.
- Davis, J.R., *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM Specialty Hand book, Ohio, USA, (1993).
- Tsuji, N., Iwata, T., Sato, M., Fujimoto, S., Minamino, Y., Aging behavior of ultrafine grained Al-2 wt%Cu alloy severely deformed by accumulative roll bonding, *Science and Technology of Advanced Materials*, 5(1-2) (2004) 173-180.
- Vaithyanathan, V., Wolverson, C., Chen, L.Q., Multiscale modeling of  $\theta'$  precipitation in Al-Cu binary alloys, *Acta Materialia*, 52(10) (2004) 2973-2987.
- پورتر، دی.ای.، ایسترنینگ، کی.ای.، استحاله فازها در فلزات و آلیاژها، ترجمه محمد رضا افضلی، مرکز نشر دانشگاهی، (۱۳۷۹).
- Dutkiewicz, J., Litynska, L., The effect of plastic deformation on structure and properties of chosen 6000 series aluminium alloys, *Materials Science and Engineering A*, 324(1-2) (2002) 239-243.
- Novikov, I., *Theory of heat treatment of metals*, Mir Publishers, Moscow, (1974).

شکل ۳ یک تصویر زمینه تاریک از این نمونه (Al-1.97 wt%Cu + 0% +  $180^\circ\text{C}$  + چهار روز) می‌باشد. رسوب‌های  $\theta'$  به‌طور تقریبی به صورت کشیده و در مواردی به صورت نامنظم در زمینه قابل رویت می‌باشند.

برای نمونه شماره (۳): Al-1.2wt%Cu + 0% +  $180^\circ\text{C}$  + یک روز، آنچه از تصاویر زمینه روشن و زمینه تاریک موجود در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود وجود رسوب‌های  $\theta'$  می‌باشد که در جهت خاص بلوری در زمینه تشکیل شده است. چگالی و اندازه این رسوب‌های  $\theta'$  تشکیل شده در این نمونه نسبت به نمونه شماره (۱) کمتر می‌باشد.

در نمونه شماره (۴): Al-2.96 wt%Cu + 80% +  $180^\circ\text{C}$  یک روز، در تصویر زمینه روشن گرفته شده شکل ۶ و ۷، رسوب‌های درشت و به‌طور تقریبی کروی  $\theta$  به وضوح مشاهده می‌شود. علاوه بر آن ساختار به هم ریخته نایجابی‌ها در اطراف این رسوب‌ها دیده می‌شود. شکل ۷ یک تصویر زمینه روشن دیگر از همین نمونه می‌باشد که رسوب‌های به‌طور تقریبی کروی  $\theta$  و کشیده  $\theta'$  قابل رویت می‌باشد. نکته جالب توجه اینکه رسوب‌های  $\theta'$ ، به‌وجود آمده در این نمونه نسبت به نمونه شماره (۱) ضخیم‌تر می‌باشد که این موضوع در شکل ۷b با بزرگنمایی  $11500\times$  به وضوح دیده می‌شود. شکل ۸ یک تصویر زمینه تاریک از همین رسوب‌های کشیده و ضخیم را نشان می‌دهد. نمونه شماره (۵): Al-1.97 wt%Cu +  $180^\circ\text{C}$  + 40% + یک روز می‌باشد. تصاویر زمینه روشن شکل ۹ مرز بین ناحیه تبلور مجدد شده و ساختار به هم ریخته نایجابی را در این نمونه نشان می‌دهد. رسوب‌های  $\theta'$  در هر دو ناحیه دیده می‌شود اما رسوب‌های  $\theta$  مشاهده نمی‌شود. اندازه و چگالی رسوب‌های به‌وجود آمده در این نمونه نسبت به نمونه شماره (۱) کمتر می‌باشد.

### ۴- نتیجه‌گیری

فرآیند رسوب‌سختی در آلیاژهای Al-Cu که درصد وزنی مس آن بیشتر از ۱/۲ باشد، مشاهده می‌شود. هم‌چنین، در نمونه‌های کارسرد نشده با افزایش غلظت مس، چگالی و